



## بررسی تجربی تاثیر تغییر پارامترهای مختلف بر رفتار لوله‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری شبه استاتیکی محوری

امید نجف‌زاده اصل<sup>1</sup>، محمدحسین پل<sup>2\*</sup>، نبی الله رضایی گلشن<sup>1</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

\* تفرش، صندوق پستی 143-14115، tafreshu.ac.ir، m\_h\_pol

### اطلاعات مقاله

دریافت: \*\*\*\*

پذیرش: \*\*\*\*

### کلیدواژگان:

لوله‌های کامپوزیتی

بارگذاری شبه‌استاتیکی

جذب انرژی ویژه

شیشه/اپوکسی

### چکیده

لوله‌های کامپوزیتی در طول استقرار در محل یا کارکرد، ممکن است تحت بارهای ضربه‌ای شبه‌استاتیکی قرار گیرند. با تعیین خواص ضربه‌ای لوله‌های کامپوزیتی و بهره‌گیری از آن‌ها در فرایند طراحی، صحت رفتار این سازه‌ها در شرایط بارگذاری شبه استاتیکی تضمین می‌شود. در پژوهش حاضر، به بررسی تاثیر تغییر پارامترهایی نظیر قطر لوله، چگالی الیاف، زاویه چیدمان الیاف و افزودن فوم بر رفتار لوله‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری پرداخته شده است. نمودار نیرو-جابجایی برای تمام آزمایش‌ها استخراج و با نمودار سایر آزمایش‌ها مقایسه شد. همچنین میزان جذب انرژی ویژه در هر آزمایش برای تمام نمونه‌ها محاسبه شد. نتایج این پژوهش نشان داد تغییر پارامترهای ذکر شده بر میزان جذب انرژی ویژه لوله‌های کامپوزیتی موثرند. به طوری که با افزایش قطر داخلی نمونه و چگالی الیاف به کار رفته برای ساخت نمونه، انرژی جذب شده ویژه نیز افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که فوم با چگالی  $700 \text{ Kg/m}^3$ ، تاثیر کمی بر میزان تحمل نیروی وارده داشت که این مسئله باعث کاهش نسبتاً کم جذب انرژی ویژه نمونه‌ها شد. ولی با افزایش چگالی فوم تا  $1400 \text{ Kg/m}^3$ ، هم مقاومت نمونه در مقابل بارگذاری صورت گرفته و هم میزان جذب انرژی ویژه افزایش پیدا کرد. از پژوهش حاضر این مسئله نیز روشن شد که برای نمونه‌های با چگالی الیاف 400 گرم بر مترمربع و زاویه چیدمان  $[\pm 45]$ ، مود له‌شدگی به شکل مود تا شدگی با الگوی خاص بود که شبیه تخریب نمونه‌های فلزی گزارش شده توسط سایر محققان می‌باشد.

## Experimental Investigation of the Effect of Different Parameters on the Behavior of Glass / Epoxy Composite Tubes under quasi-Static axial Loading

Omid Najafzade Asl, Mohammad Hosein Pol\*, Nabi Rezaei Golshan

Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran.

\* P.O.B. 14115-143 Tafresh, Iran, m\_h\_pol@tafreshu.ac.ir

### Keywords

Composite tubes  
Quasi-static loading  
Specific absorbed energy  
Glass/epoxy

### Abstract

Composite tubes may be subjected to quasi-static loads during placement or operation. By determining the impact properties of composite tubes and using them in the design process, the accuracy of the behavior of these structures in a quasi-static loading condition is guaranteed. In the present study, the effect of changing parameters such as pipe diameter, fiber density, fiber alignment angle and the addition of foam on the behavior of glass/epoxy composite tubes under axial loading has been investigated. The force-displacement diagram was extracted for all experiments and compared with other experiments. Also, the specific energy absorption in each experiment was calculated for all samples. The results of this study showed that the change of parameters mentioned on the energy absorption of composite tubes is effective. As the sample's internal diameter and the density of the fibers used to make the sample increases, the specific absorbed energy also increases. Also, the results showed that with increasing foam density up to  $1400 \text{ Kg/m}^3$ , the sample resistance was increased against the loading and the specific energy absorption was increased. From the present study, it was also clear that for samples with fiber density of  $400 \text{ g/m}^2$  and angle of alignment  $[\pm 45]$ , the clustering mode was folding with a special pattern, similar to the destruction of metal samples reported by other researchers.

می‌شود [1]. امروزه، استفاده از مواد کامپوزیتی به عنوان ماده انتخابی به جای مواد فلزی در بسیاری از کاربردهای فناوری مشاهده می‌شود. لوله‌های کامپوزیتی در طول استقرار در محل یا کارکرد، ممکن است تحت بارهای شبه‌استاتیکی قرار گیرند. این بارها می‌توانند در اثر سقوط اجسام، به وجود آمده و آسیب‌های داخلی قابل توجهی را ایجاد کنند که موجب کاهش شدید مقاومت باقیمانده لایه‌ها در لوله‌های کامپوزیتی می‌شوند. از این رو، رفتار این لوله‌ها در مقابل بارگذاری شبه‌استاتیکی و همچنین پارامترهای موثر بر آن‌ها

### 1- مقدمه

کاهش وزن ساختاری تنها یک جزء از یک سیستم مکانیکی، تاثیر مثبت بسزایی در کارکرد سایر اجزا دارد. به عنوان مثال، کاهش جرم بدنه یک قطار، می‌تواند منجر به صرفه‌جویی در وزن سیستم کشش، تعلیق، ترمز و سایر بخش‌های آن شود. کاهش وزن کلی قطار سبب کاهش سایش در ریل‌ها، چرخ‌ها و یاطاقان‌ها نیز می‌گردد که به نوبه خود باعث کاهش تعمیرات

Please cite this article using:

Najafzade-Asl, O. Pol, M. H. and Rezaei-Golshan, N., "Experimental Investigation of the Effect of Different Parameters on the Behavior of Glass / Epoxy Composite Tubes under quasi-Static axial Loading", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. \*, No. \*, pp. \*\*, \*\*.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

استاتیکی برش پانچ پرداختند و نتیجه گرفتند که تغییر هندسه ضربه‌زن باعث تغییر مکانیزم شکست، می‌شود. آنان در مطالعه‌ای دیگر [13]، به بررسی ویژگی‌های برش پانچ صفحات کامپوزیتی ساخته شده از شیشه/اپوکسی/CNT پرداختند. نتایج آنان نشان داد که استفاده از نانو لوله‌های کربنی، استحکام نمونه‌ها را کاهش داد. مهربانی و همکاران [14]، رفتار لمینت ساخته شده از الیاف شیشه‌ای بافته شده تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی با ضربه‌زن‌های مختلف را بررسی کردند. نتایج نشان داد که بیش‌ترین منطقه آسیب در حد سرعت بالستیک برای هر پرتابه است و پرتابه در این منطقه دچار انحراف شدید می‌گردد. هان و همکاران [15]، یک بررسی عددی جامع برای ارزیابی پاسخ و ظرفیت جذب انرژی لوله‌های ترکیبی ساخته شده از کامپوزیت پلاستیکی تقویت شده با الیاف پیچیده شده در جهت  $\pm 45^\circ$  به روش پالتروزن را انجام دادند. آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی عددی، رفتار خردشدگی این لوله‌ها را تحت هر دو بارگذاری شبه‌استاتیکی و دینامیکی محوری بررسی کردند. آنان دریافتند که این لوله‌ها می‌توانند به عنوان گزینه مناسب‌تر در ساختارهای جذب انرژی استفاده شوند. هونگ و وانگ [16] به بررسی پاسخ له‌شدگی لوله‌های تقویت شده با الیاف کربن تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی پرداختند. در طی آزمایش‌های انجام شده، له‌شدگی پیش‌رونده پایدار و مود شکست له‌شدگی ترد، مشاهده شد. آن‌ها دریافتند که وجود پخ در یک انتهای لوله باعث ایجاد کنترل در وضعیت له‌شدگی، کاهش نیروی اوج اولیه و افزایش استحکام روند له‌شدگی محوری می‌شود.

لویس ان.اس. چپو و همکاران [17]، یک مطالعه تجربی بر روی رفتار کامپوزیت کربن/اپوکسی تحت بار استاتیکی و دینامیکی با نرخ کرنش تا  $100 \text{ s}^{-1}$  انجام دادند. نتایج نشان داد که مواد تست شده تا نرخ کرنش  $100 \text{ s}^{-1}$ ، مستقل از نرخ کرنش هستند. موده‌های آسیب بدست آمده، نیز با افزایش نرخ بارگذاری نمونه‌ها، ثابت باقی ماندند. امین دنیز و همکاران [18]، اثر شرایط محیطی بر عمر خستگی لوله‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری ضربه‌ای را بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش زمان غوطه‌وری در آب، به خاطر خوردگی ماتریس در اثر نمک آب دریا، جدایش ماتریس و الیاف بیش‌تر می‌شود. همچنین مشاهده شد که در نمونه‌های سالم، آسیب نشت و فوران، در انتهای نمونه رخ می‌دهد ولی در نمونه‌های تحت ضربه، این آسیب‌ها در منطقه ضربه رخ می‌دهند.

مطالعات صورت گرفته توسط محققان، به طور عمده با هدف بررسی میزان کارایی نمونه‌های کامپوزیتی به عنوان جاذب انرژی صورت گرفته است. در این پژوهش نیز، تاثیر پارامترهایی نظیر چگالی الیاف، قطر داخلی، زاویه چیدمان الیاف و پرکردن لوله با فوم بر روی رفتار له‌شدگی و میزان جذب انرژی نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده از الیاف دوبعدی شیشه و رزین اپوکسی مورد مطالعه قرار گرفت. بری اطمینان بیش‌تر از نتایج به دست آمده، هر آزمایش دو بار تکرار شد و میانگین داده‌های دو آزمایش، جهت مقایسه با سایر آزمایش‌ها در نظر گرفته شد.

## ۲- روش تهیه و ساخت مواد

### ۲-۱- تهیه مواد اولیه

در این پژوهش، ماتریس از نوع رزین اپوکسی، دیکلیسیدیل اتر بیسفنول نوع A<sup>۲</sup> با نام تجاری ایپون 828 تولید شده توسط شرکت شل به عنوان پایه اپوکسی که از خواص خوب این رزین به استحکام بالای مکانیکی و سازگاری

باید به‌دقت مورد مطالعه قرار گرفته و با شناخت رفتار لوله‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی، بتوان از قابلیت اطمینان سازه حین این بارگذاری‌ها اطمینان حاصل کرد [2-3]. این مساله منجر به انجام فعالیت‌ها و تحقیقات عمیقی در زمینه مقاومت مواد کامپوزیتی در برابر بارهای خارجی شده است. آگاهی از خواص و رفتار این مواد در برابر بارگذاری‌های مختلف، مستلزم بررسی تحقیقات و مطالعات انجام شده توسط دیگران می‌باشد.

کاکوگانیس و همکاران [4]، میزان جذب انرژی لوله‌های کامپوزیتی ساخته شده به روش پالتروزن که تحت بار له‌شدگی محوری قرار داشت را بررسی کردند. آن‌ها تاثیر توده‌های انفجار را بر پاسخ لوله، با در نظر گرفتن فاصله له‌شدگی، نیروی متوسط له‌شدگی و میزان جذب انرژی خاص بررسی کردند. نتایج نشان داد که میزان له‌شدگی با افزایش نفوذ صورت گرفته، افزایش یافت. هوانگ و همکاران [5]، آزمایش‌های شبه‌استاتیکی را بر روی لوله‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف انجام دادند تا پاسخ له‌شدگی آن‌ها را در برابر بارگذاری مذکور بررسی کنند. آن‌ها دریافتند که بر اساس معیار شکست چنگ-چنگ<sup>۱</sup>، مدل المان محدود دو لایه برای توصیف حالت‌های شکست له‌شدگی و میزان جذب انرژی نمونه‌های لوله‌های کامپوزیتی نسبتاً موثر است. هول [6]، ویژگی‌های اصلی خم‌شدگی پیش‌رونده را در لوله‌های دایره‌ای تحت بارگذاری فشاری محوری به صورت خلاصه و جامع بررسی کرده است و در مورد تاثیر چیدمان الیاف بر له‌شدگی پیش‌رونده در لوله‌های کامپوزیتی کربن / اپوکسی با الیاف تک‌جهته و لوله‌های شیشه / اپوکسی بافته شده بحث کرده است. سونگ و همکاران [7]، به بررسی تجربی تاثیر عوامل متعدد مانند نرخ کرنش، ضخامت دیواره کامپوزیت، چیدمان الیاف در جهت  $[+0]$  در لایه‌های کامپوزیت و خواص مکانیکی لوله فلزی تحت بار ضربه‌ای پرداختند. آن‌ها چهار حالت اصلی فروپاشی را برای لوله‌های هیبرید گزارش دادند که عبارتند از: فروپاشی به شکل لوزی مرکب، تکه‌تکه شدن ترکیبی، جدایش بین لایه‌های و شکست فاجعه‌بار. اوکانو و همکاران [8]، خواص جذب انرژی لوله‌های پلاستیکی تقویت شده با الیاف بافته شده ترکیبی را مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند لوله‌هایی که زاویه بافت الیاف آن‌ها ۶۰ درجه است، بیشترین میزان جذب انرژی را نشان می‌دهند. کاراگیوزو و همکاران [9]، اثر سرعت و جرم برخوردکننده بر میزان انرژی جذب شده و نوع مکانیزم تغییرشکل پوسته‌های استوانه‌ای را مورد مطالعه قرار دادند. آنان متوجه شدند که میزان انرژی جذب شده و نوع تغییر شکل، به جرم و سرعت برخوردکننده وابسته است. میرزایی و همکاران [10]، یک ارزیابی تجربی و تحلیلی بر روی لوله‌های ترکیبی با سطح مقطع دایره‌ای که تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی هستند را انجام دادند. نتایج آزمایش‌های تجربی آنان نشان داد که چیدمان لایه‌های کامپوزیتی، تاثیر قابل توجهی بر روی مقدار جذب انرژی لوله‌ها دارد.

آن‌ها با توجه به این تاثیر مهم، یک مدل تحلیلی با استفاده از جهت گیری الیاف در هر لایه کامپوزیت ارائه دادند که نتایج آن، مطابقت خوبی با نتایج تجربی داشت. دیوید و جانسون [11]، تاثیر نرخ کرنش بر مکانیزم شکست و جذب انرژی عضوهای کامپوزیتی پلیمری را تحت بارگذاری محوری بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش‌های عددی مطرح شده در این مقاله، می‌تواند در آینده برای توسعه یک پایگاه داده جامع از خواص جذب انرژی مواد کامپوزیتی و همچنین طراحی عددی معتبر این اجزا، استفاده گردد. صادقی و پل [12]، در پژوهشی به بررسی رفتار صفحات کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تقویت شده با نانو لوله‌های کربنی تحت بارگذاری شبه

<sup>2</sup> A diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA)

<sup>1</sup> Change-Chang

جهت جلوگیری از نفوذ رزین به داخل مندرل مقوایی، قبل از پیچش الیاف، یک لایه نوار چسب شیشه‌ای پهن به دور مندرل مقوایی پیچیده شد تا ضمن جلوگیری از نفوذ رزین به داخل مقوا، باعث سهولت در خارج کردن مندرل از داخل نمونه شود.

## ۲-۲- ساخت و آماده سازی نمونه

به سبب کاهش هزینه های پژوهش، ساخت نمونه ها به روش دستی انجام شد. هرچند روش ساخت دستی به اندازه روش پیچش الیاف دقیق نیست، ولی در این پژوهش سعی بر آن شد تا در هر مرحله از ساخت، پارامترهای موثر در نتایج پژوهش مانند درصد وزنی رزین و هاردنر، طول الیاف، زاویه الیاف، دمای محیط، قطر مندرل و کسر حجمی الیاف و رزین در نمونه به دقت کنترل شود تا کمترین میزان خطا در نتایج آزمایش ها به دست آید.

**Table 1** Specifications of the fibers used in the manufacture of the samples

جدول ۱ مشخصات الیاف به کار برده شده در ساخت نمونه‌ها					
نوع الیاف	چگالی سطحی (g/m <sup>2</sup> )	ضخامت (mm)	مدول یانگ (Gpa)	استحکام تسلیم (Mpa)	مدول ویژه (Gpa-m <sup>3</sup> /Kg)
شیشه E	200	0.2	85	1550	0.34
شیشه E	400	0.25	97	1700	0.36



**Fig. 1** Cardboard Mandrel for composite tube

شکل ۱ مندرل مقوایی جهت ساخت لوله کامپوزیتی



**Fig. 2** machining of surface of mandrel for sizing

شکل ۲ ماشین کاری سطح مندرل برای سایز کردن



**Fig. 3** A: tube rotor device B: Low speed 12Kw motor

شکل ۳ الف: دستگاه چرخان لوله . ب: موتور 12 کیلووات سرعت پایین

بالا با الیاف‌ها می‌توان اشاره کرد، انتخاب شده است. سفت کننده‌های بسیاری برای اپون 828 از طرف شرکت سازنده، پیشنهاد شده‌است که بسته به کاربرد کامپوزیت، مناسب‌ترین آن انتخاب می‌شود. در این پژوهش از سفت کننده سیکلوآلیفاتیک آمین اصلاح شده با نام تجاری اف ۲۰۵<sup>۱</sup> برای این رزین استفاده شده است. نسبت مخلوط رزین به سفت کننده طبق پیشنهاد شرکت سازنده 2 به 1 است.

برای تهیه‌ی ماده‌ی کامپوزیتی از الیاف شیشه نوع E که دارای بافت دو بعدی با خواص طولی و عرضی یکسان بوده، استفاده شده است. جهت بررسی تاثیر فاکتور چگالی سطحی در تعدادی از آزمایش‌ها، نمونه‌ها با دو نوع الیاف شیشه یکی با چگالی سطحی 200 gr/m<sup>2</sup> و دیگری با چگالی سطحی 400 gr/m<sup>2</sup> ساخته شده‌اند (شکل 2). در صورتی که چگالی الیاف کمتر از مقدارهای پیشنهادی باشد، در روش لایه چینی دستی، امکان خروج تارها از حالت عمود بر هم و در نتیجه تغییر خواص مطلوب نهایی وجود دارد.

در این پژوهش برای نمونه‌های فوم‌دار، از فوم پلی‌اورتان یخچالی سرد استفاده شد که جزو فوم‌های با جاذب انرژی بالاست. پلی‌اورتان از ترکیب دو ماده ایزوسیانات و پلی‌ال در حضور کاتالیست و افزودنی‌ها تولید می‌شود. بسته به نوع پلی‌ال و ایزوسیانات مختلف مورد استفاده، پلی‌اورتان تولید شده ممکن است حالت فوم، جامد و یا مایع داشته باشد. این فوم از ترکیب ایزوسیانات و پلی‌ال به نسبت 1 به 1 و هم زدن دو مایع به مدت 5 دقیقه به دست می‌آید. پس مخلوط کردن میزان مشخصی از 2 ماده فوق و هم زدن مخلوط حاصله، ماده شروع به افزایش حجم و در اصلاح پف کردن می‌کند. در برخی از نمونه‌ها جهت بررسی تاثیر چگالی فوم بر میزان انرژی جذب شده، در مرحله پف کردن، دو طرف لوله بسته شد تا فوم چگال‌تری بدست آید. در شکل ۳، فوم پلی‌اورتان و نمونه ساخته شده، مشاهده می‌شود.

در ساختارهای کامپوزیتی، ماتریس به عنوان فاز زمینه، وظیفه انتقال یکنواخت نیرو به تمام بخش‌های الیاف را دارد. به همین دلیل دقت در نحوه ساخت رزین، باعث افزایش خواص مطلوب سازه می‌شود. در این پژوهش، برای ساخت ماتریس، با توجه به دستور ساخت شرکت سازنده، رزین اپوکسی و هاردنر، به نسبت 2 به 1 در یک ظرف پلاستیکی ریخته شدند. سپس جهت مخلوط شدن دو ماده فوق به صورت یکنواخت، مایع به مدت 5 دقیقه هم زده شد.

در ساخت لوله‌های کامپوزیتی، الیاف معمولاً به دور یک قالب استوانه‌ای شکل که مندرل نامیده می‌شود، پیچیده می‌شوند. با بررسی مندرل‌های موجود در بازار که می‌توانستند در ساخت نمونه‌های این پژوهش به کار برند، نتیجه گرفته شد که ساخت نمونه‌های این پژوهش، نیازمند مندرلی است که هم به راحتی از داخل قطعه خارج شود و هم بتوان قطر داخلی مورد نظر برای ساخت نمونه‌ها را در مندرل ایجاد کرد. لذا از نوعی مندرل مقوایی که معمولاً به عنوان لوله‌های نگهدارنده پارچه به صورت رول کاربرد دارند، استفاده شد. چراکه به سبب جنس مقوایی این مندرل‌ها، به راحتی با روش روتراشی با ماشین تراش، می‌توان قطر خارجی مندرل را به اندازه قطر داخلی نمونه رساند. همچنین پس از ساخت نمونه، با خیس کردن نمونه، مندرل به راحتی از داخل نمونه خارج شد. دلیل دیگر استفاده از نوع مندرل، عدم صرف هزینه و سهولت در تهیه این نوع مندرل و به طور کلی صرفه جویی در هزینه و زمان ساخت و تهیه مندرل بود.

<sup>1</sup> Epikure F-205



Fig. 6 A: Tension device B: Sample between two jaws  
شکل ۶ الف: دستگاه کشش. ب: نمونه بین دو فک دستگاه کشش

#### ۴- نتایج

##### ۴-۱- مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی

نمودارهای نیرو-جابجایی آزمایش‌های شبه‌استاتیکی به دست آمده در این پژوهش به سه ناحیه تقسیم شدند (شکل ۷). ناحیه اول که مربوط به ابتدای بارگذاری تا قبل از شروع تخریب است. در این ناحیه، نمودار با شیب تند شروع به صعود نزولی نمودار شروع می‌شود. در این نقطه است که نمودار تسلیم شده و تخریب نمونه شروع می‌شود. در ناحیه دوم، نمودار حول یک مقدار معین شروع به نوسان می‌کند که این مقدار، نیروی متوسط<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. در این ناحیه است که نمونه، انرژی له‌شدگی را جذب می‌کند. در ناحیه سوم، انباشتگی قسمت‌های تخریب شده، باعث افزایش بار وارده و صعود نمودار می‌شود.

در این پژوهش، آزمون شبه‌استاتیکی با دستگاه کشش 150KN شرکت سننام، مطابق طراحی آزمایش صورت گرفته در جدول ۲، بر روی نمونه‌ها انجام شد. هر آزمایش، ۲ بار تکرار شد و برای بررسی نتایج، میانگین داده‌های دو آزمایش در نظر گرفته شدند. در حین انجام آزمایش، نیروسنجی که بر روی دستگاه قرار داشت، داده‌های نیرو برحسب جابجایی را ثبت کرده و پس از ارسال داده‌ها به رایانه، در نرم‌افزار مربوط به دستگاه کشش، نمودار نیرو-جابجایی استخراج شد. در تمام آزمایش‌ها، پیش‌روی تخریب تا جایی که نیرو با شیب تند، افزایش پیدا کند، ادامه یافت. در شکل ۸، نمونه‌ای از نمودار نیرو-جابجایی برای آزمایش‌های صورت گرفته که از نرم‌افزار مربوط به دستگاه کشش استخراج شده است دیده می‌شود.

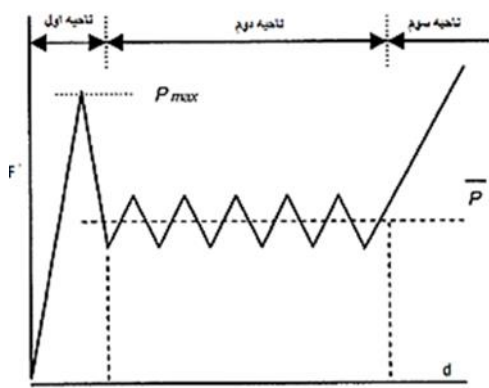


Fig. 7 force-displacement schematic of test quasi static  
شکل ۷ شماتیک نمودار نیرو-جابجایی آزمون شبه‌استاتیکی

پس از مخلوط کردن رزین و هاردنر به میزان مشخص و آماده شدن ماتریس، الیاف به دور مندرل پیچیده شدند. در هنگام پیچیدن الیاف، یک جسم به وزن ۴ کیلوگرم به عنوان پیش بار، بر روی الیاف قرار داده شد. هر لایه، به پیچش الیاف به دور مندرل مقوایی، مقدار مشخصی رزین توسط قلم موی نقاشی به طور یکنواخت در تمام نواحی الیاف پخش شد. در شکل ۴، مرحله پیچش لوله به دور مندرل، مشاهده می‌شود.

پس از اتمام پیچش الیاف به دور مندرل، لوله در دستگاه چرخان لوله، قرار داده شد. لوله‌ها به مدت ۳ ساعت در دستگاه، چرخانده شدند تا به پخت اولیه برسند. سپس از دستگاه خارج شده و به مدت ۵ ساعت بدون دوران در دمای محیط قرار داده شدند. پس از پخت کامل و آماده شدن لوله کامپوزیتی، مندرل از لوله‌ها خارج شد. از آنجایی که عرض الیاف ۱ متر بود، طول هر کدام از لوله‌های ساخته شده نیز ۱ متر شد و پس از ساخت، توسط اهر دستی، به نمونه‌هایی با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر تقسیم شدند. سپس، با استفاده از دستگاه تراش، زاویه ۴۵ درجه در یک انتهای نمونه‌ها ایجاد شد (شکل ۵).

##### ۳- آزمون شبه‌استاتیکی

برای بررسی پارامترهای موثر بر رفتار لوله‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری دینامیکی محوری، نمونه‌ها مطابق جدول ۱ ساخته شدند. مشخصات نمونه‌ها و تنظیمات مربوط به هر آزمایش، در این جدول گنجانده شده است. برای هر آزمایش تعداد ۲ نمونه ساخته شده تا جهت اطمینان از صحت نتایج، هر آزمایش، دو بار انجام گیرد.

آزمون‌های شبه‌استاتیکی با دستگاه کشش دانشگاه تفرش انجام شد. این دستگاه ساخت شرکت سننام با حداکثر ظرفیت ۱۵۰KN است. نمونه‌ها، بین ۲ فک دستگاه قرار داده شد و سرعت پیشروی متناسب با نوع آزمون، در نرم افزار دستگاه تنظیم گردید.



Fig. 4 Fiber winding and sample manufacturing  
شکل ۴ پیچش الیاف و ساخت نمونه



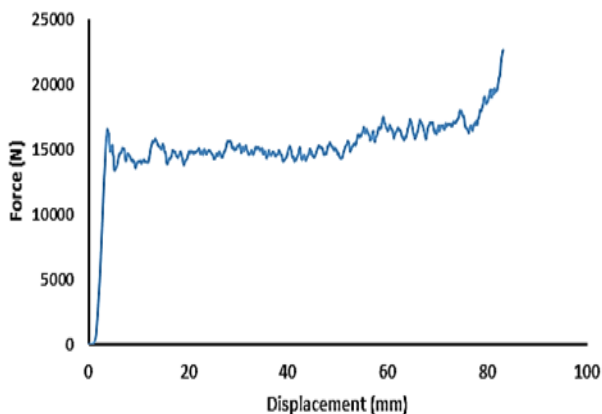
Fig. 5 chamfering with 45 degree angle at the end of samples  
شکل ۵ ایجاد پخ با زاویه ۴۵ درجه در انتهای نمونه



**Table 2** Specimen specs and settings for each experiment

جدول ۲ مشخصات نمونه‌ها و تنظیمات مربوط به هر آزمایش

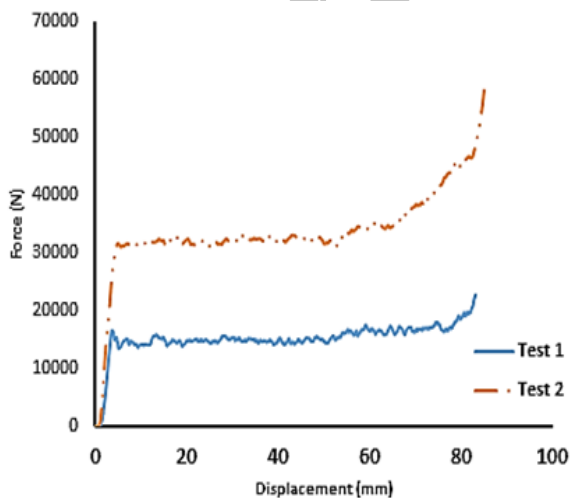
شماره آزمایش	چگالی الیاف ( $gr/m^2$ )	زاویه چیدمان (درجه)	قطر داخلی (میلیمتر)	ضخامت نمونه (میلیمتر)	ارتفاع نمونه (میلیمتر)	تعداد لایه	زاویه انتها (درجه)	سرعت بارگذاری ( $mm/min$ )	چگالی فوم ( $kg/m^3$ )	تعداد نمونه
1	200	[0,90]	40	2.5	100	10	45	10	-----	2
2	400	[0,90]	40	3	100	10	45	10	-----	2
3	200	[±45]	40	2.5	100	10	45	10	-----	2
4	400	[±45]	40	3	100	10	45	10	-----	2
5	200	[0,90]	30	2.5	100	10	45	10	-----	2
6	400	[0,90]	30	3	100	10	45	10	-----	2
7	400	[0,90]	50	2.5	100	10	45	10	-----	2
8	200	[0,90]	60	2.5	100	10	45	10	-----	2
9	200	[0,90]	40	2.5	100	10	45	10	700	2
10	200	[0,90]	40	2.5	100	10	45	10	1400	2
11	400	[0,90]	40	3	100	10	45	10	700	2



**Fig. 9** force-displacement diagram of test 1

شکل ۹ نمودار نیرو-جابجایی آزمایش شماره 1

در آزمایش 2، نمونه‌های ساخته شده با الیاف  $400 gr/m^2$  تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی قرار گرفت. تمام پارامترهای این آزمایش به جز جنس الیاف، نسبت به آزمایش شماره 1، ثابت نگه داشته شد تا تاثیر چگالی الیاف بر میزان جذب انرژی و استحکام لوله‌های کامپوزیتی مشخص شود. در شکل 10، مقایسه نمودار نیرو-جابجایی آزمایش 1 و 2 مشاهده می‌شود.

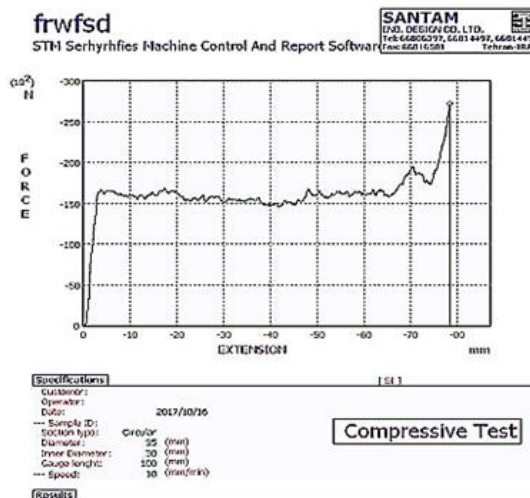


**Fig. 10** Comparing force-displacement diagram of test 1&2

شکل 10 مقایسه نمودار نیرو-جابجایی آزمایش 1 و 2

در پژوهش حاضر، آزمایش شماره 1 به عنوان آزمایش معیار قرار گرفت تا نتایج سایر آزمایش‌ها با نتایج آزمایش 1 مقایسه شود. با توجه به شکل 9، مقدار حداکثر نیرو برای آزمایش 1، برابر  $16400 (N)$  و مقدار نیروی متوسط آن برابر  $15000(N)$  است. همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار حداکثر نیرو و نیروی متوسط، اختلاف زیادی با یکدیگر ندارند و از این مورد، می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌های ساخته شده برای این آزمایش، برای استفاده به عنوان جاذب انرژی مناسب هستند. چرا که در نمونه‌هایی که سطح نیروی متوسط له‌شدگی، بسیار پایین تر از میزان حداکثر نیرو در ناحیه اول باشد، مشخص می‌شود که پس از افزایش نیرو در ناحیه اول، یک شکست فاجعه بار در نمونه، رخ داده است که باعث افت شدید نیرو در ادامه روند نمودار گشته و همین شکست، باعث کاهش سطح استحکام باقیمانده نمونه می‌شود.

از حدود 52 میلیمتر پس از تخریب نمونه، به دلیل اجتماع تکه‌های تخریب شده در داخل نمونه و مقاومت در برابر نیروی وارده، نمودار نیرو-جابجایی کم کم شروع به بالا رفتن کرده است. پس از 82 میلیمتر، تخریب نیز، مقدار تکه‌های انباشته شده در داخل نمونه به قدری زیاد می‌شود که مانع از ادامه روند تخریب نمونه شده و افزایش نیرو پس از آن، به دلیل مقاومت این تکه‌های انباشته در مقابل نیرو است.



**Fig. 8** force-displacement diagram of Tensile devise software

شکل 8 نمودار نیرو-جابجایی استخراج شده از نرم‌افزار دستگاه کشش

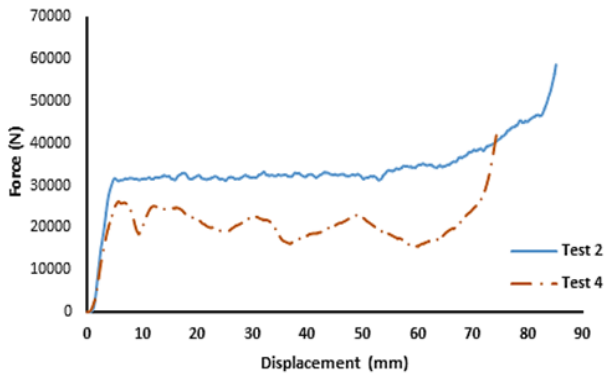


Fig. 12 Comparing force-displacement diagram of 2&4

شکل ۱۲ مقایسه نمودار نیرو-جابجایی 2 و 4

در هر دو نمودار نیرو-جابجایی، نمودار پس از ناحیه اول و رسیدن به اوج بار، یک سقوط محسوس دارد ( نشانگر A ). این سقوط احتمالاً به دلیل ایجاد یک ترک عمیق و یا شکستگی در داخل نمونه برای ماتریس است و در جایی که این شکست به الیاف با زاویه 45 درجه می‌رسد، الیاف مقاومت کرده و نمودار دوباره صعود می‌کند. این مسئله در ناحیه دوم نمودارها نیز قابل رؤیت است و نوسان هر دو نمودار حول نیروی متوسط، شدیدتر از نمودارهای معیار (آزمایش 1 و 2) است. زیرا در این ناحیه نیز، به دلیل اینکه الیاف در راستای اعمال نیرو نیستند، نیرو بیش‌تر توسط ماتریس به بدنه الیاف منتقل می‌شود و در این میان در بعضی نقاط، ماتریس دچار شکست ناگهانی و یا ترک عمیق می‌شود که این مسئله، باعث افت شدید نیرو در برخی نواحی در نمودارها می‌شود.

نکته حائز اهمیت در نمودار نیرو-جابجایی این دو آزمایش، افت شدید نمودار در انتهای ناحیه دوم دقیقاً قبل از افزایش نیرو در اثر اجتماع تکه‌های جدا شده است. این مسئله نشان دهنده کاهش مقاومت لوله قبل از تخریب شدن بیش از 50 درصد طول نمونه است. البته در نمودارهای آزمایش 3 و 4، کاملاً دیده می‌شود که شیب کلی نمودار در ناحیه دوم به سمت پایین است و هرچه نمونه‌ها بیش‌تر تخریب می‌شوند، نیروی له‌شدگی کاهش می‌یابد. از این امر، می‌توان نتیجه گرفت که در نمونه‌های دارای چیدمان  $[±45]$ ، مقدار جذب انرژی می‌تواند به پارامتر طول لوله نیز بستگی داشته باشد. بدین صورت که با افزایش طول لوله در این نمونه‌ها، احتمالاً نیروی متوسط له‌شدگی نیز افزایش می‌یابد.

در آزمایش 5، تا 8، به بررسی تاثیر قطر لوله بر میزان جذب انرژی پرداخته شده است. قطر داخلی نمونه‌های ساخته شده با الیاف  $200 \text{ gr}/\text{m}^2$  در آزمایش 5 مقدار 30 میلیمتر، در آزمایش 7 برابر 50 میلیمتر و در آزمایش 8 برابر 60 میلیمتر در نظر گرفته شده است. در شکل 13 مقایسه بین نمودارهای نیرو-جابجایی این سه آزمایش با آزمایش 1 مشاهده می‌شود.

با توجه به شکل 13 به وضوح مشخص است که با افزایش قطر داخلی نمونه‌ها، هم حداکثر نیروی اولیه و هم نیروی متوسط، افزایش می‌یابد. البته شایان ذکر است که با افزایش قطر نمونه و ثابت ماندن تعداد لایه‌ها، وزن نمونه افزایش پیدا کرده و این امر در افزایش نیروی قابل تحمل از طرف نمونه، تاثیرگذار است. بررسی تاثیر قطر در میزان جذب انرژی برای نمونه‌های ساخته شده از الیاف 400 نیز انجام شد. در آزمایش 6، دو نمونه با الیاف 400 و قطر 30 میلیمتر ساخته و تحت آزمایش شبه استاتیکی قرار گرفت. مقایسه بین نمودار حاصل از این آزمایش و آزمایش 2، در شکل 14 قابل مشاهده است.

همانطور که در شکل 10 دیده می‌شود، حداکثر نیرو و نیروی متوسط نمونه‌های ساخته شده با الیاف  $400 \text{ gr}/\text{m}^2$  حدود 2 برابر نمونه های  $200 \text{ gr}/\text{m}^2$  است و این نشان می‌دهد که با افزایش چگالی الیاف، به دلیل این که الیاف با تراکم بالاتر، استحکام بالاتری دارند، میزان مقاومت و انرژی جذب شده نیز افزایش چشمگیری می‌یابد. همچنین ملاحظه می‌شود که در قسمت انتهایی ناحیه 2 (از حدود 60 میلیمتر به بعد) شیب افزایش نمودار برای آزمایش 2، بیش‌تر از آزمایش 1 است که دلیل آن اجتماع بیش‌تر قسمت‌های له‌شده در داخل نمونه برای نمونه آزمایش 2 نسبت به آزمایش 1 است. زیرا با افزایش چگالی الیاف در آزمایش 2، سطح مقطع نمونه‌ها نیز نسبت به نمونه آزمایش 1 افزایش یافته و در طول تخریب، مقدار کامپوزیت تخریب شده و تجمع یافته در درون نمونه برای آزمایش 2 بیش‌تر از 1 می‌باشد.

در آزمایش 3 و 4، به بررسی تاثیر چیدمان الیاف بر میزان جذب انرژی نمونه‌های کامپوزیتی پرداخته شد. بدین منظور در آزمایش 3، نمونه‌ها با الیاف  $200 \text{ gr}/\text{m}^2$  و چیدمان  $[±45]$  و در آزمایش 4، نمونه‌ها با الیاف  $400 \text{ gr}/\text{m}^2$  و چیدمان  $[±45]$  ساخته شده و تحت آزمایش شبه استاتیکی قرار گرفتند. در شکل 11 و 12، مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی برای این دو آزمایش با آزمایش‌های 1 و 2 قابل مشاهده است.

همانطور که در شکل 11 و 12 دیده می‌شود، با تغییر زاویه الیاف در چیدمان نمونه، هم حداکثر نیرو و هم نیروی متوسط له‌شدگی کاهش می‌یابد. چرا که با تغییر چیدمان الیاف از  $[0,90]$  به  $[±45]$  در ابتدای بارگذاری، نیروی محوری وارد شده به نمونه، با زاویه 45 درجه به الیاف انتقال پیدا می‌کنند. این در حالی است که در چیدمان  $[0,90]$ ، نیروی محوری وارد، با زاویه 0 درجه به الیاف در راستای طولی انتقال می‌یابد و از آنجایی که بیش‌تری آستانه تحمل الیاف در برابر نیرو، زمانی است که الیاف دقیقاً در راستای نیرو باشند، پس با تغییر زاویه، آستانه تحمل الیاف، کاهش پیدا کرده و حداکثر نیروی نمودار قبل از شروع شکست نمونه، کاهش می‌یابد. همچنین به دلیل آنکه در نمونه‌ها با زاویه الیاف  $[±45]$  نیز، تخریب از نوع پیش‌رونده است، میزان نیروی متوسط له‌شدگی در ناحیه دوم نمودار، با میزان حداکثر نیرو، فاصله کمی داشته و بدین ترتیب میزان پارامتر نیروی متوسط له‌شدگی در نمونه با الیاف  $[±45]$  نسبت نمونه با الیاف  $[0,90]$  کاهش می‌یابد.

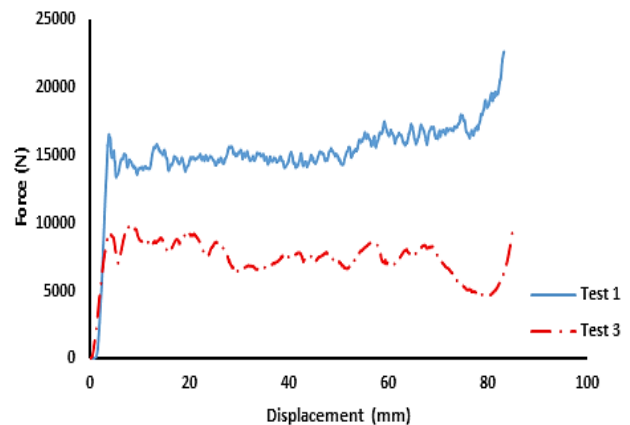


Fig. 11 Comparing force-displacement diagram of test 1&3

شکل ۱۱ مقایسه نمودار نیرو-جابجایی آزمایش 1 و 3

آزمایش 1) و این نشان می دهد که افزایش چگالی فوم و یا استفاده از فومهایی با چگالی بالاتر، باعث بهبود معنی دار میزان جذب انرژی می شود. همچنین در نمودار آزمایش 10 در شکل 15، ملاحظه می شود که نمودار پس از حدود 60 میلیمتر تخریب شدن نمونه، دچار سقوط می شود و این سقوط تا جایی ادامه پیدا می کند که نمودار در اثر اجتماع تکه های جدا شده دوباره افزایش پیدا می کند. دلیل این سقوط را میتوان مربوط به چگالی فوم دانست. چون فوم استفاده شده در آزمایش 60، تراکم بیشتری دارد، با افزایش له شدگی نمونه، متراکم تر می شود. تا جایی که این تراکم باعث می شود تا از طرف داخل به دیواره نمونه فشار وارد شده و برای تخریب نمونه نیروی محوری کمتری لازم باشد. زیرا بخشی از نیروی تخریب، توسط فشار وارده از فوم متراکم به دیواره نمونه تامین می شود.

**۵- جذب انرژی**

توانایی جذب انرژی در لوله های کامپوزیتی در طول فرآیند آزمایش های شبه استاتیکی با چند پارامتر مشخص می شوند که عبارتند از: انرژی جذب شده کلی: برابر است با مساحت زیر نمودار نیرو - جابجایی که به مساحت سطح مقطع نمونه و چگالی نمونه وابسته است و با E نشان داده می شود. این پارامتر با انتگرال گیری عددی از نمودار نیرو - جابجایی به دست می آید [19].

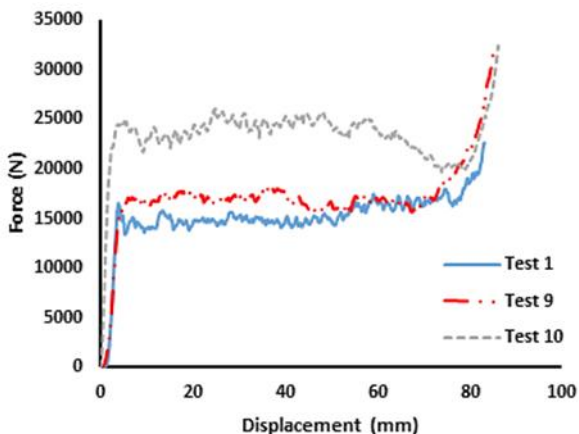


Fig. 15 Comparing force-displacement diagram test 9&10with 1  
شکل 15 مقایسه نمودار نیرو-جابجایی آزمایش 9 و 10 و آزمایش 1

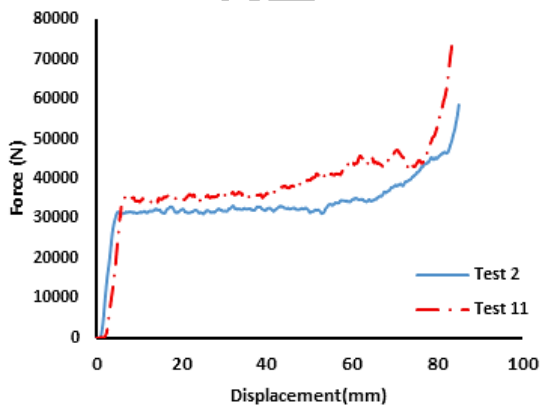


Fig. 16 Comparing force-displacement diagram test 11with 2  
شکل 16 مقایسه نمودار نیرو-جابجایی 11 و 2

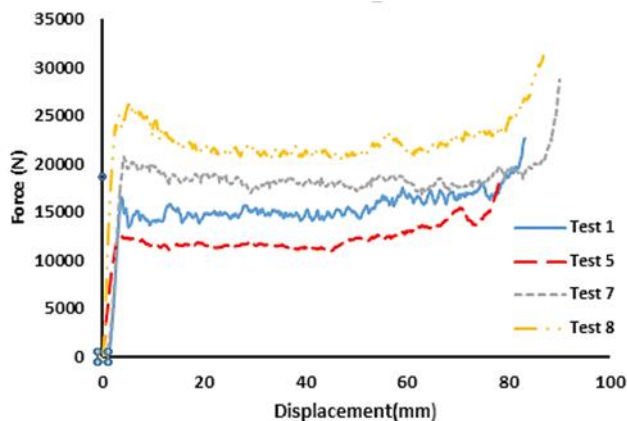


Fig. 13 Comparing force-displacement diagram of test 5 & 7 & 8 with 1  
شکل 13 مقایسه نمودار نیرو-جابجایی آزمایش 5، 7 و 8 با آزمایش 1

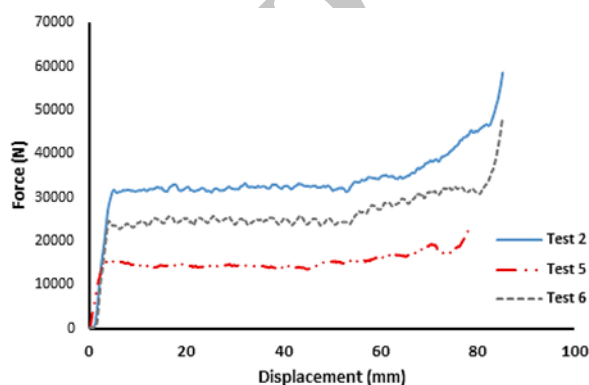


Fig. 14 Comparing force-displacement diagram of test 6 with 5 & 2  
شکل 14 مقایسه نمودار آزمایش 6 با آزمایش 5 و 2

همانطور که از شکل 14 مشخص است، در نمونه های ساخته شده با الیاف  $400 \text{ gr}/\text{m}^2$  نیز تغییر قطر، سبب تغییر نیروی اولیه شکست و متوسط نیروی له شدگی می شود. همچنین مقایسه نمودار نیرو-جابجایی دو آزمایش 5 و 6 در شکل 14 نیز نشان می دهد که تاثیر چگالی الیاف بر میزان انرژی جذب شده در آزمایش های شبه استاتیکی محوری، مستقل از قطر لوله کامپوزیتی است.

یکی از مباحث مورد تحقیق در این پژوهش، بررسی تاثیر وجود فوم در داخل لوله و تغییر چگالی فوم، بر روی میزان جذب انرژی نمونه ها تحت بارگذاری شبه استاتیکی محوری بود. بدین منظور از یک فوم پلی اورتان سخت، برای پر کردن داخل لوله ها استفاده شد. چگالی فوم پر شده در نمونه های آزمایش 9 و 11 برابر  $700 \text{ Kg}/\text{m}^3$  و در آزمایش 10 برابر  $1400 \text{ Kg}/\text{m}^3$  می باشد. در شکل 15 و 16، مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی آزمایش های صورت گرفته با نمونه های دارای فوم و نمونه های بدون فوم نشان داده شده است.

در هر دو شکل 15 و 16 ملاحظه می شود که نمونه های پر شده با فوم با چگالی کم تر، تاثیر کمی (حدود 10 درصد) در افزایش حداکثر نیرو و نیروی متوسط له شدگی دارند. این نشان می دهد که تاثیر فوم با چگالی  $700 \text{ Kg}/\text{m}^3$  بر روی بهبود جذب انرژی لوله های کامپوزیتی ناچیز است. ولی همان طور که در نمودار شکل 18 برای آزمایش 10 دیده می شود، با دو برابر شدن چگالی فوم پر شده در داخل نمونه، میزان متوسط نیروی له شدگی و حداکثر نیرو، به شدت افزایش می یابد (حدود 65 درصد بیش تر نسبت به

## ۶- مود شکست

برای نمونه‌های تحت آزمون شبه استاتیکی، مود شکست در اکثر نمونه‌ها به صورت شکست ترد همراه با مود بازشدگی پیش‌رونده بود. در این آزمایش‌ها، به دلیل سرعت پایین بارگذاری نسبت به آزمون‌های ضربه انجام شده در پژوهش‌های محققین، شکست پیش‌رونده در نمونه‌ها منظم تر اتفاق افتاده و همین امر باعث می‌شود تا نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه‌های آزمایش شبه استاتیکی، پس از اندکی جابجایی به سمت بالا، با نوسانات منظم، ادامه یابد. عامل جذب انرژی در این نمونه‌ها، شکست ماتریس در جهت محوری (شکل 18-الف)، برش الیاف و جدایش بسته‌های لایه‌های کامپوزیتی از همدیگر (شکل 18-ب) و نیز ترک‌های عمیق طولی در راستای الیاف بود. در طی آزمون‌ها، مشاهده شد که تکه‌های ریز ماتریس و قطعات کوچک الیاف، از نمونه جدا شده و بر روی فک دستگاه کشش تجمع کردند. نیروی شبه استاتیکی وارد بر نمونه‌ها، باعث خم شدن لایه‌ها به صورت برگی از ساقه، به داخل و بیرون نمونه و در نهایت ایجاد شکستگی در طول نمونه‌ها شد. عامل جذب انرژی در این نمونه‌ها، شکست ماتریس در جهت محوری (شکل 18-الف)، برش الیاف و جدایش بسته‌های لایه‌های کامپوزیتی از همدیگر (شکل 18-ب) و نیز ترک‌های عمیق طولی در راستای الیاف بود. در طی آزمون‌ها، مشاهده شد که تکه‌های ریز ماتریس و قطعات کوچک الیاف، از نمونه جدا شده و بر روی فک دستگاه کشش تجمع کردند. نیروی شبه استاتیکی وارد بر نمونه‌ها، باعث خم شدن لایه‌ها به صورت برگی از ساقه، به داخل و بیرون نمونه و در نهایت ایجاد شکستگی در طول نمونه‌ها شد. خم شدگی به سمت داخل، باعث تجمع قطعه‌های کامپوزیتی در داخل نمونه شد که این امر در طول بارگذاری نمونه، باعث افزایش ناگهانی نیرو و صعود نمودار نیرو-جابجایی در انتهای نمودار شد.

در طی آزمایش‌های شبه استاتیکی فوق ملاحظه شد که وضعیت تخریب نمونه‌هایی که با چیدمان الیاف با زاویه  $[±45]$  ساخته شده‌اند با نمونه‌های ساخته شده با چیدمان  $[0,90]$  متفاوت است.

از همان شروع ایجاد تخریب در نمونه، تکه‌های بزرگی از نمونه جدا شدند (شکل 19-ب). در ادامه بارگذاری، مود شکست به صورت له‌شدگی نامتوازن و خرد شدگی تکه‌های بزرگ، ظاهر می‌شود (شکل 19-ج). پس از باربرداری و فاصله گرفتن فک‌های دستگاه کشش از همدیگر، نمونه تکه تکه شده همراه با خرد شدگی شدید ماتریس و شکست الیاف در جهت طولی و راستای الیاف، مشاهده شد (شکل 19-د). برای نمونه‌های ساخته شده با الیاف  $400 \text{ gr/m}^2$  و چیدمان  $[±45]$  (شکل 20-الف) نیز، وضعیت تخریب، متفاوت بود. در شروع بارگذاری، پس از تخریب ناحیه پخ خورده، نیروی له‌شدگی افزایش یافت و این افزایش نیرو، باعث به وجود آمدن ترک ماتریس در راستای الیاف شد (شکل 20-ب). با افزایش نیرو، این ترک‌ها عمیق تر شده و تخریب نمونه شروع شد (شکل 20-ج). در این مرحله، علاوه بر شکست ماتریس، برش الیاف نیز اتفاق افتاد. در ادامه بارگذاری مشاهده شد که نمونه با مود تا شدگی با الگوی خاص، دچار تخریب شد (شکل 20-د). این وضعیت تخریب، همانند تخریب نمونه‌های فلزی در پژوهش برخی محققان بود. پس از اتمام بارگذاری و جدا شدن فک‌های دستگاه کشش از همدیگر، مشاهده شد که نمونه به آهستگی و با حالت فتری، در راستای طولی منبسط شد. این حالت، شبیه له‌شدگی یک فنر و باز شدگی آن پس از حذف نیروی فشاری بود. با بررسی روند ساخت و مشخصات نمونه‌های دو آزمایش 3 و 4، علت تفاوت مود شکست برای نمونه‌های این دو آزمایش

بازده ضربه: خردشدن یک لوله، منجر به تراکم لوله می‌شود. این امر باعث افزایش مداوم سطح نیروی بارگذاری شده همزمان باعث افزایش تغییر شکل می‌شود. تغییر شکل نسبی لوله که در آن فشردگی اتفاق می‌افتد به عنوان بازده ضربه مشخص می‌شود و با SE نشان داده می‌شود.

$$SE = u/h \quad (1)$$

در این معادله،  $u$  برابر با طول له‌شدگی لوله و  $h$  ارتفاع لوله است [20-21]. انرژی جذب شده ویژه: برای مقایسه نمونه‌ها با هندسه و یا جنس متفاوت، مقایسه این پارامتر ضروری است. انرژی جذب شده ویژه برابر است با میزان جذب انرژی واحد جرم ماده جاذب و با SEA مشخص می‌شود.

$$SEA = \frac{P_m}{A\rho} \quad (2)$$

در این معادله،  $P_m$  برابر میانگین بار له‌شدگی،  $A$  برابر مساحت سطح مقطع و  $\rho$  چگالی لوله کامپوزیتی است [20].

هدف از انجام آزمون‌های شبه استاتیکی فوق، بررسی میزان جذب انرژی توسط نمونه‌های ساخته شده برای هر آزمایش در بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری بود. بدین منظور، با انتگرال‌گیری عددی از داده‌های نمودار نیرو-جابجایی تا زمان تخریب نمونه و قبل از افزایش نهایی نیرو، برای هر آزمایش، میزان انرژی جذب شده بدست آمده و در جدول 2 گنجانده شد. همانطور که در جدول 2 مشاهده می‌شود، مقادیر پارامتر انرژی جذب‌شده ویژه با استفاده از معادله 2 برای تمام آزمایش‌ها محاسبه شده است و مقایسه بین کارایی جذب انرژی نمونه‌ها با مقایسه این پارامتر صورت می‌گیرد. همچنین در شکل 20 نمودار ستونی مقادیر جذب انرژی ویژه، برای تمام آزمایش‌های صورت گرفته، آورده شده است.

از نتایج به دست آمده در جدول 3 و شکل 17 ملاحظه می‌شود که نمونه‌های آزمایش 2 بیش‌ترین جذب انرژی در طول تخریب را داشته‌اند. چرا که نمونه‌های این آزمایش، با الیاف مقاوم و چگالی بالاتر ساخته شده‌اند که برای تخریب، نیازمند نیروی متوسط له‌شدگی بیش‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها هستند. این مسدله در نمودار نیرو-جابجایی این آزمایش نیز مشاهده شد. اما برای پارامتر انرژی جذب شده ویژه، بیش‌ترین مقدار مربوط به نمونه‌های پر شده با فوم در آزمایش 11 می‌باشد. البته میزان اختلاف مقادیر انرژی جذب شده ویژه برای دو آزمایش 11 و 2 بسیار اندک است و این نشان می‌دهد که استفاده از فوم با چگالی 700، تاثیر عکس بر کارایی جذب انرژی ویژه لوله‌های کامپوزیتی دارد. اما با مقایسه نتایج جذب انرژی ویژه دو آزمایش 10 و 1 می‌توان دریافت که با افزایش چگالی فوم استفاده شده در ساخت لوله‌های کامپوزیتی، انرژی جذب شده ویژه لوله در آزمون شبه‌استاتیکی به‌طور معنی داری افزایش می‌یابد.

برای نمونه‌های ساخته شده با چیدمان الیاف  $[±45]$ ، مشاهده می‌شود که میزان جذب انرژی ویژه در مقایسه با نمونه‌های ساخته شده با چیدمان  $[0,90]$  به شدت کاهش یافته‌است. ازین رو می‌توان نتیجه گرفت که در لوله‌های کامپوزیتی، تغییر زاویه چیدمان الیاف دو بعدی از  $[0,90]$  باعث کاهش کارایی آن‌ها به عنوان جاذب انرژی می‌گردد. همچنین بررسی تاثیر قطر داخلی نمونه بر میزان جذب انرژی ویژه لوله کامپوزیتی در شکل 17 نشان داد که با افزایش قطر لوله‌های کامپوزیتی از 30 میلیمتر تا 60 میلیمتر، افزایش نسبتاً کم میزان انرژی جذب شده ویژه را به دنبال خواهد داشت.



نمونه با فوم، بر روی میزان جذب انرژی نمونه‌های ساخته شده از جنس الیاف شیشه و رزین اپوکسی که تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی با سرعت 10 میلیمتر بر دقیقه با دستگاه کشش دانشگاه تفرش بودند، مورد مطالعه قرار گرفت.

نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده به شرح زیر هستند:

تغییر چگالی الیاف به‌کاررفته در ساخت نمونه‌ها از  $200 \text{ gr/m}^2$  به  $400 \text{ gr/m}^2$  در عین داشتن تعداد لایه و ارتفاع یکسان، در طی آزمایش بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری، باعث شد تا هم حداکثر نیروی وارده و هم نیروی متوسط له شدگی، 2 برابر می‌شود.

نتایج بررسی برای تاثیر زاویه چیدمان الیاف در ساختار نمونه بر روی میزان جذب انرژی در بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری نشان داد که تغییر چیدمان از  $[0,90]$  به  $[\pm 45]$ ، باعث افت سطح نیروی مورد نیاز جهت تخریب نمونه و در نتیجه افت کارایی جذب انرژی آن‌ها شد.

افزایش قطر داخلی نمونه‌ها از 40 میلیمتر تا 60 میلیمتر، باعث افزایش مقاومت آن‌ها در مقابل بارگذاری شبه‌استاتیکی و همچنین افزایش سطح نمودار نیرو-جابجایی شد. ولی باتوجه به این‌که وزن نمونه‌ها با افزایش قطر، افزایش پیدا کرد، میزان جذب انرژی ویژه افزایش معنی‌داری نداشت.

مشخص شد. ظاهراً کسر حجمی الیاف در ساختار نمونه، بیش‌ترین تاثیر را در تفاوت مود شکست برای این دو آزمایش داشت. نمونه‌های ساخته شده با الیاف  $200 \text{ gr/m}^2$  در آزمایش 3، دارای 50 درصد کسر حجمی الیاف در ساختار خود بودند. به همین دلیل در طی بارگذاری شبه‌استاتیکی، نیروی وارده از طریق ماتریس به بدنه الیاف منتقل شده و این امر سبب شکستن الیاف و جدایش تکه‌های بزرگ کامپوزیتی از بدنه نمونه می‌شد. در نمونه‌های ساخته شده با الیاف  $400 \text{ gr/m}^2$ ، کسر حجمی الیاف حدود 63 درصد و ماتریس حدود 37 درصد بود.

واضح است که با افزایش کسر حجمی الیاف، مقاومت نمونه نیز افزایش می‌یابد. به همین دلیل نمونه‌های آزمایش 4 بر خلاف آزمایش 3، با شکستگی و جدا شدگی تکه‌های بزرگ، همراه نبودند. بلکه به علت اینکه نیروی وارده با زاویه 45 درجه به بدنه الیاف وارد شد، این امر سبب خم شدگی و تا شدن نمونه در الگوی خاص تا انتهای بارگذاری بود.

### ۷- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، پارامترهای موثر بر رفتار لوله‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری بررسی شد. در این تحقیق، تاثیر پارامترهایی نظیر چگالی الیاف، قطر داخلی نمونه، زاویه چیدمان الیاف و پرکردن داخل

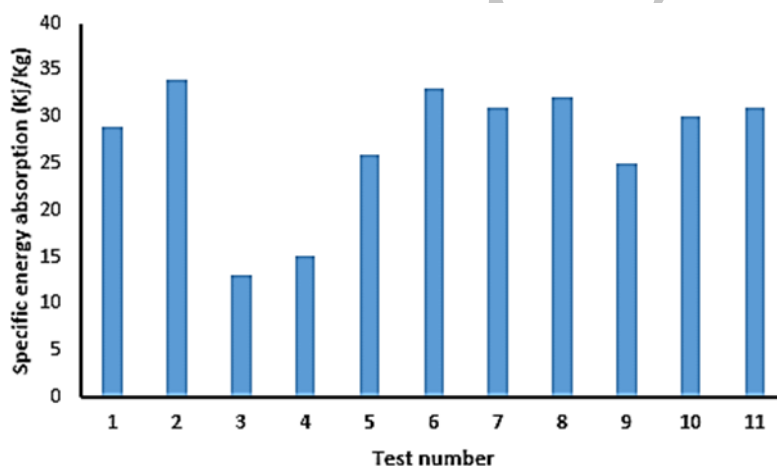


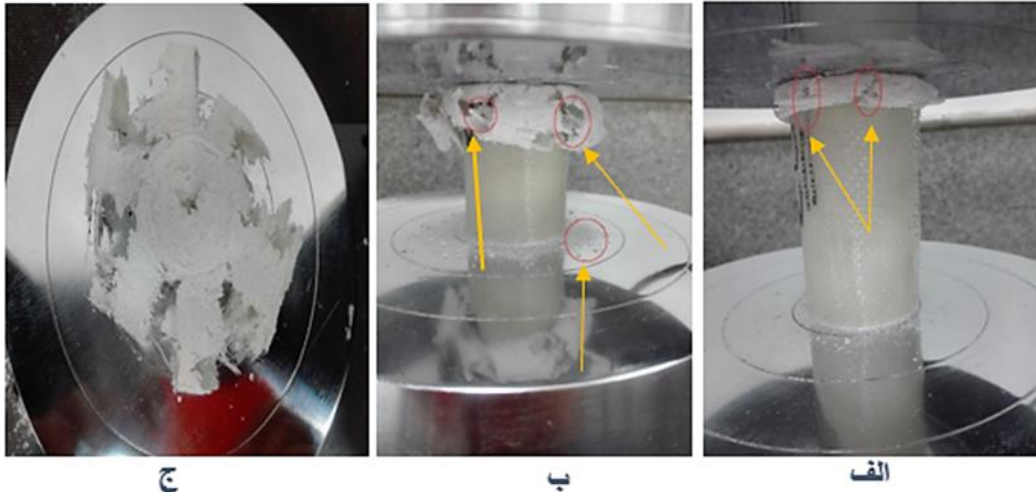
Fig. 17 Column graph of energy absorption and specific energy absorption for quasi-static tests

شکل ۱۷ نمودار ستونی میزان جذب انرژی و جذب انرژی ویژه برای آزمون‌های شبه‌استاتیکی

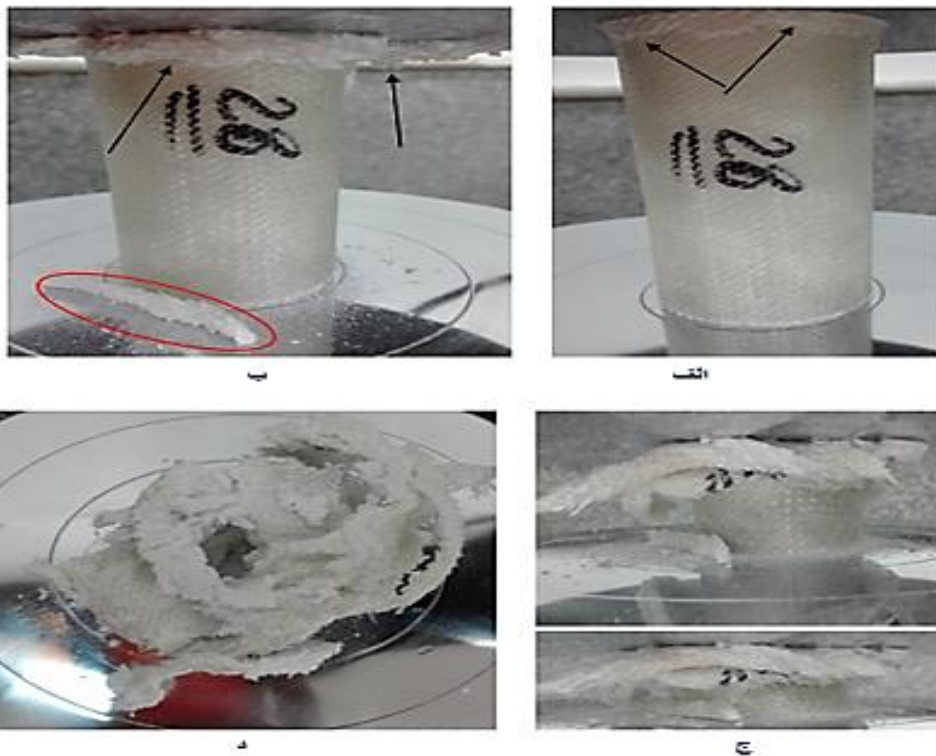
جدول ۳ نتایج آزمایش‌های شبه‌استاتیکی

Table 3 Results of quasi-static tests

شماره آزمایش	چگالی الیاف (g/m <sup>2</sup> )	تعداد لایه‌ها	ارتفاع نمونه (میلیمتر)	میزان تخریب (میلیمتر)	نیروی متوسط تخریب (Pm) (کیلو نیوتن)	انرژی جذب شده (ژول)	انرژی جذب‌شده ویژه (SEA) (Kj/Kg)	بازده ضربه (SE) (درصد)
1	200	10	100	82	15	1260.73	29	82
2	400	10	100	81	31	2669.75	34	81
3	200	10	100	80	8	595.3	13	80
4	400	10	100	60	22	1198.5	15	60
5	200	10	100	76	11.5	916.11	26	76
6	400	10	100	81	24	2058	33	81
7	200	10	100	86	17.5	1554.1	31	86
8	200	10	100	83	22.5	1814.2	32	83
9	200	10	100	81	17	1350.8	25	81
10	200	10	100	79	24	1840.04	30	79
11	400	10	100	76	37	2770.4	31	76



**Fig. 18** failure in quasi-static test A: Deflection of the matrix in the axial direction B: Cutting of fibers & composite separation. C: bending in and out  
 شکل ۱۸ شکست در آزمون شبه استاتیکی. الف: شکست ماتریس در جهت محوری. ب: برش الیاف و جدایش کامپوزیت. ج: خم شدگی به داخل و بیرون.



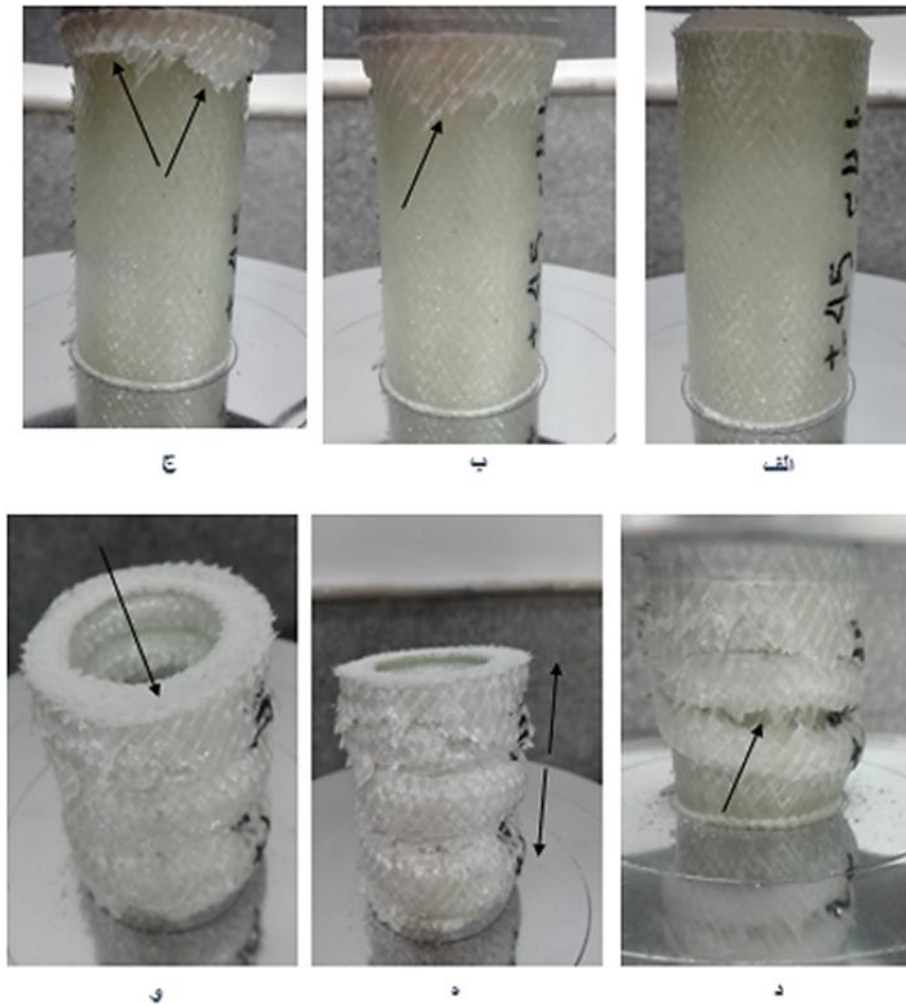
**Fig. 19** Specimen failure with fiber density of 200 g / m2 with angle of alignment [± 45]. A: Crack along the fibers at the onset of failure. B: The separation of composite pieces. C: Unbalanced crushing and sample crushing. D: Chopped sample after loading

شکل ۱۹ شکست نمونه با چگالی الیاف 200 گرم بر مترمربع با زاویه چیدمان  $[±45]$ . الف: ترک در راستای الیاف در شروع شکست. ب: جدا شدن تکه های کامپوزیت.

ج: له شدگی نامتوازن و خرد شدن نمونه. د: نمونه خرد شده پس از بارگذاری

برای نمونه‌های با چگالی الیاف 400 گرم بر مترمربع و زاویه چیدمان  $[±45]$ ، مود له شدگی به شکل مود تا شدگی با الگوی خاص بود که شبیه تخریب نمونه‌های فلزی گزارش شده توسط سایر محققان می‌باشد. از نتایج این پژوهش، میتوان در صنایع مختلفی جهت به دست آوردن پاسخ سازه‌های استوانه‌ای شکل کامپوزیتی در برابر بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری استفاده کرد. به طور مثال در صنایع نظامی برای پیش‌بینی رفته ارا به فرود هواپیما و یا بالگرد، در هنگام فرود می‌توان از نتایج فوق، بهره برد.

در آزمایش‌های شبه استاتیکی به بررسی تاثیر فوم پلی اورتان یخچالی سرد بر میزان جذب انرژی لوله‌های کامپوزیتی نیز پرداخته شد و نتایج نشان داد که فوم با چگالی  $700 \text{ Kg/m}^3$ ، تاثیر کمی بر میزان تحمل نیروی وارده داشت که این مسئله باعث کاهش نسبتاً کم جذب انرژی ویژه نمونه‌ها شد. ولی با افزایش چگالی فوم تا  $1400 \text{ Kg/m}^3$ ، هم مقاومت نمونه در مقابل بارگذاری صورت گرفته و هم میزان جذب انرژی ویژه افزایش پیدا کرد.



**Fig. 20** Specimen failure with fiber density of 400 g/m<sup>2</sup> and angle of alignment [± 45]. A: Sample before loading. B: Crack in the direction of the fibers. C: Breaking the fibers at 45 degrees and 0 degrees. D: Modal failure pattern with specific pattern. E, and F: Extension of the sample length after loading.

شکل ۲۰ شکست نمونه با چگالی الیاف 400 گرم بر مترمربع و زاویه چیدمان [±45]. الف: نمونه قبل از بارگذاری. ب: بوجود آمدن ترک در جهت الیاف. ج: شکست الیاف با زاویه 45 و 0 درجه. د: مود شکست تا شدگی با الگوی خاص. ه، و: انبساط طولی نمونه پس از بار برداری.

Technology, Volume 40, Issue 4, Pages 377-421, ISSN 0266-3538, 1991.

[7] Song, H. W. Wan, Z. M. Xie, Z. M. and Du, X. W., "Axial Impact Behavior and Energy Absorption Efficiency of Composite Wrapped Metal Tubes" International Journal of Impact Engineering, 24(4), 385-401, 2000.

[8] Okano, M. Sugimoto, K. Saito, H. Nakai, A. Hamada, H., "Effect of the Braiding Angle on the Energy Absorption Properties of a Hybrid Braided FRP Tube". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 219(1), 59-66. 2005

[9] Karagiozova, M. Alves, N. Jones, "Inertia Effects in Axisymmetrically Deformed Cylindrical Shells under Axial Impact", International Journal of Impact Engineering, Vol. 24, pp. 1083-1115, 2000.

[10] Mirzaei, M. Shakeri, M. Sadighi, M. and Akbarshahi, H., "Experimental and Analytical Assessment of Axial Crushing of Circular Hybrid Tubes Under Quasi-Static Load, Composite Structures", Volume 94, Issue 6, Pages 1959-1966, ISSN 0263-8223, 2012.

[11] Matthew David, Alastair F. and Johnson, "Effect of Strain Rate on the Failure Mechanisms and Energy Absorption in Polymer Composite Elements under Axial Loading" Composite Structures, Volume 122, Pages 430-439, ISSN 0263-8223, 2015.

[12] Sadeghi, M. and Pol, M. H., "Investigation of Behaviors of Glass/epoxy Laminate Composites Reinforced with Carbon Nanotubes under Quasi-static Punch Shear Loading" Journal of Sandwich Structures & Materials: 1099636217719223, 2017.

۸- مراجع

[1] Sadeghi, M. and Pol, M. H., "Experimental Investigation of the Effect Effective Of Factors and Parameters on the Punch on the Properties of Quasi-Static Punching Shear the Glass/Epoxy Composite" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No. 4, pp. 13-22, 2016. (In Persian )

[2] Rahimi-Sharbafe, H. Rahimi, G. H. and Liaghat, G. H., "Experimental Study of Behavior of Filament Winding Composite Pipes With Liner Using Glass Fibers and Silica Nanoparticles Under Impact Loading" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 4, pp. 311-320, 2017. (In Persian)

[3] Pol, M. H. and Liaghat, G. H., "Studies on the Mechanical Properties of Composites Reinforced with Nanoparticles" Polymer Composites 38.1: 205-212, 2017. (in Persian)

[4] Kakogiannis, D. Chung Kim Yuen, S. Palanivelu, S. Van Hemelrijck, D. Van Paepegem, W. Wastiels, J. Vantomme, J. and Nurick, G. N., "Response of Pultruded Composite Tubes Subjected to Dynamic and Impulsive Axial Loading", In Composites Part B: Engineering, Volume 55, Pages 537-547, ISSN 8368-1395, 2013.

[5] Jiancheng, H. and Xinwei, W., "Numerical and Experimental Investigations on the Axial Crushing Response of Composite Tubes" Composite Structures, Vol. 91, Issue 2, Pages 222-228, ISSN 0263-8223, 2009.

[6] Hull, D., "A Unified Approach to Progressive Crushing of Fiber-Reinforced Composite Tubes" Composites Science and

- [13] Sadeghi, Mohammad, and Mohammad Hossein Pol. "Experimental Studies on the Punch Shear Characterization of Glass/epoxy/CNTs Laminate Nanocomposites." *Polymer Composites*.
- [14] Yeganeh, E. M. Liaghat, G. H. and Pol, M. H., "Laminate Composites Behavior under Quasi-static and High Velocity Perforation" *STEEL AND COMPOSITE STRUCTURES*, 22(4), 777-796, 2016.
- [15] Han, Haipeng, Taheri, Farid, Pegg, Neil and Lu, You, "A Numerical Study on the Axial Crushing Response of Hybrid Pultruded and  $\pm 45^\circ$  Braided Tubes" *Composite Structures*, Volume 80, Issue 2, Pages 253-264, ISSN 0263-8223, 2017.
- [16] Huang, Jiancheng and Wang, Xinwei, "Numerical and Experimental Investigations on the Axial Crushing Response of Composite Tubes" *Composite Structures*, Volume 91, Issue 2, Pages 222-228, ISSN 0263-8223, 2009.
- [17] Chiu, L. N. Falzon, B. G. Ruan, D. Xu, S. Thomson, R. S. Chen, B. and Yan, W., "Crush Responses of Composite Cylinder under Quasi-static and Dynamic Loading" *Composite Structures*, 131, 90-98, 2016.
- [18] Deniz, M. E. Ozen, M. Ozdemir, O. Karakuzu, R. and Icten, B. M., "Environmental Effect on Fatigue Life of Glass-epoxy Composite Pipes Subjected to Impact Loading" *Composites Part B: Engineering*, 44(1), 304-312, 2013.
- [19] Kim, J. S. Yoon, H. J. and Shin, K. B., "A Study on Crushing Behaviors of Composite Circular Tubes with Different Reinforcing Fibers" *International Journal of Impact Engineering*, 38(4), 198-207, 2011.
- [20] Abdewi, E. F. Sulaiman, S. Hamouda, A. M. S. and Mahdi, E., "Effect of Geometry on the Crushing Behaviour of Laminated Corrugated Composite Tubes" *Journal of materials processing technology*, 172(3), 394-399, 2006.

Archive of SID